

более вероятно влияние данных параметров на неравномерное распределение свойств. При малых модулях также возможно изменение свойств, обусловленное краевыми эффектами при упрочнении материала у кромок зубьев. При невозможности обеспечения равномерного распределения свойств важно обеспечить максимальные свойства на наиболее нагруженных участках боковых поверхностях зубьев. Поэтому при выборе параметров технологии лазерной закалки необходимо учитывать теоретическую эпюру интенсивности изнашивания.

Современные устройства позволяют проводить лазерную обработку при сканирующем перемещении лазерного луча по пятну обработки, обеспечивать различную геометрическую форму пятна излучения и распределение энергии в нем. ЛЗ боковых поверхностей зубчатых колес с использованием сканирующего излучения позволяет обеспечить оптимальный энерговклад в каждый элемент поверхности и, соответственно, оптимальное распределение свойств согласно распределению факторов износа по рабочей поверхности зубьев.

Взаимовлияние параметров технологии лазерной закалки и показателей, определяющих долговечность зубчатых передач, представлена на рисунке 1.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дунаев, П.Ф. Конструирование узлов и деталей машин/ П.Ф. Дунаев, О.П. Леликов. – М.: Высшая школа, 2001. – 416 с.
2. Фролов, М.И. Техническая механика. Детали машин/ М.И. Фролов. – М.: Высшая школа, 1990.– 352 с.
3. Гинзбург Е.Г. Производство зубчатых колес. Л: «Машиностроение», 1978. – 521с.
4. Зинченко В.М. Инженерия поверхности зубчатых колес методами химико-термической обработки. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. – 303 с.
5. Surface hardening of gears by laser beam processing. Zhang, H., Shi, Y., Xu, C.Y., Kutsuna, M. / Surface Engineering. Volume 19, Issue 2, April 2003, P. 134 – 136.
6. Григорьянц А.Г., Шиганов И.Н., Мисюров А.И. Технологические процессы лазерной обработки. – М.: МГТУ им. Н.Э.Баумана. – 2008. – 664 с.
7. Исследование влияния параметров лазерной обработки на поверхностный слой конструкционной стали / В.Ю.Наскевич, В.А. Струк, О.Г. Девойно, П.В. Веремей // Веснік Гродзенскага дзяржаўнага ўніверсітэта імя Янкі Купалы. Сер. Тэхніка. №4, 2013. – С. 59 – 65.

УДК 621. 9. 06

Каштальян И.А.

УПРАВЛЕНИЕ КИНЕМАТИКОЙ ПРОЦЕССОВ РЕЗАНИЯ ПРИ ОБРАБОТКЕ ОТВЕРСТИЙ НА МНОГООПЕРАЦИОННЫХ СТАНКАХ С ЧПУ

Белорусский национальный технический университет

Минск, Беларусь

Рассмотрена задача повышения эффективности использования многооперационных станков с ЧПУ путем введения в процесс резания кинематической неустойчивости. Представлены математические модели и алгоритмы управления подачей и скоростью резания в функции пути. Приведены примеры их использования при синтезе структуры циклов обработки отверстий.

Одной из приоритетных задач современного машиностроения является автоматизация мелкосерийного и серийного производства. В настоящее время она решается главным образом путем внедрения оборудования с числовым программным управлением (ЧПУ), в том числе многооперационных станков. Большинство станков этого типа используется для обработки сложных корпусных деталей, плит, кронштейнов и других деталей, имеющих большое число отверстий. Главным образом это крепежные отверстия небольшого диаметра и отверстия, предназначенные для базирования присоединяемых при сборке деталей (основные отверстия). Основные отверстия могут быть гладкими или ступенчатыми, односторонними и двусторонними, могут располагаться в одной плоскости или соосно в нескольких параллельных стенках.

Технологические переходы обработки отверстий выполняются по типовым схемам, которые имеют ряд общих признаков.

1. Большинство переходов выполняется за один проход (многопроходные технологические переходы характерны для обработки глубоких отверстий с периодическим выводом сверла и обработки отверстий в разных стенках).

2. Траектория инструмента в пределах прохода состоит из участков рабочего и вспомогательного ходов (рабочий ход, как правило, включает недоход, участок резания и перебег).

3. Недоход обычно принимают равным 1...3 мм для предварительно обработанных поверхностей и 5...10 мм для необработанных поверхностей.

4. Перебег зависит от размера заборного конуса инструмента и принимается больше его длины на 1...3 мм.

5. На участке резания траектория инструмента может иметь промежуточные опорные точки, которые характеризуются изменением частоты вращения шпинделя и минутной подачи, либо выполнением включения, выключения или реверса вращения шпинделя.

6. Вспомогательный ход включает быстрый подвод инструмента к обрабатываемому отверстию и его возврат в исходную точку.

С учетом указанных признаков строятся типовые единичные циклы обработки отверстий. Для упрощения программирования обработки заготовок деталей, имеющих несколько одинаковых элементов (отверстий) используются постоянные циклы и подпрограммы.

В общем случае постоянный цикл обработки отверстий включает: 1) быстрое позиционирование стола (при необходимости вращение), выбор частоты и направления вращения шпинделя, включение вращения шпинделя; 2) быстрое позиционирование инструмента по оси Z в точку, находящуюся на расстоянии 1...3 мм от поверхности заготовки; 3) рабочий ход вдоль оси Z с заданной подачей до требуемой глубины отверстия (в зависимости от типа постоянного цикла движение осуществляется непрерывно или прерывисто), в конце рабочего хода может быть задана выдержка времени; 4) подготовку к возврату инструмента в исходное положение (в зависимости от типа цикла это останов шпинделя, изменение направления его вращения, фиксация его углового положения); 5) возврат инструмента в исходное положение по оси Z на скорости быстрого хода или на рабочей подаче (с вращением или без вращения шпинделя).

Анализ существующих циклов обработки отверстий позволил выявить ряд их существенных недостатков [1,2]. К таким недостаткам относятся: а) отсутствие возможности управлять частотой вращения и подачей режущего инструмента на этапе его врезания в заготовку; б) выдержка времени предусмотрена только в конце рабочего хода, хотя для таких циклов как глубокое сверление ее следовало бы задавать после каждого прерывания подачи; в) не предусмотрено плавное уменьшение подачи по мере перемещения инструмента к выходу из зоны резания, вследствие чего при обработке хрупких материалов, имеет место выкрашивание кромок деталей.

Сведение к минимуму указанных недостатков может быть обеспечено путем включения в технологическое программное обеспечение устройства ЧПУ дополнительных программных модулей, выполняющих функцию прерывания подачи с последующей выдержкой времени, а также согласованного управления частотой вращения шпинделя и подачей в функции пути [3,4]. Для этого необходимо разработать соответствующие математические модели и алгоритмы управления и на их основе создать циклы обработки отверстий с новой структурой.

Программные модули, реализующие математические модели и алгоритмы согласованного изменения частоты вращения шпинделя (скорости резания) и подачи, а также прерывание подачи с последующей выдержкой времени были разработаны и включены в технологическое программное обеспечение микропроцессорного устройства ЧПУ КМ 65.

Увеличение (уменьшение) частоты вращения шпинделя n и минутной подачи S в функции пути осуществляется приращениями Δn и ΔS соответственно по мере обработки участков Δl между их приращениями [5,6]. Управляющие устройства при этом реализуют следующие зависимости:

$$n_k = n_n \pm |\Delta n / \Delta l|; \quad (1)$$

$$S_k = S_n \pm \Delta S / \Delta l, \quad (2)$$

где n_n и n_k - начальная и конечная частоты вращения шпинделя, об/мин; S_n и S_k - начальная и конечная скорости подачи, мм/мин; l - длина перемещения, на которой частота вращения шпинделя изменяется от n_n до n_k , а подача от S_n до S_k . Величина ΔS принимается из ряда 0,1; 0,2; 0,3 мм/мин и т. д. Величина Δl находится из выражения: $\Delta l = \pm \Delta S / (S_k - S_n)$ и принимается кратной длине перемещения исполнительного органа станка при подаче устройством ЧПУ одного импульса. Знак “плюс” или “минус” указывает соответственно на увеличение или уменьшение частоты вращения шпинделя и подачи. Число приращений n_s подачи и частоты вращения шпинделя на участке длиной l определяется из соотношения: $n_s = l / \Delta l$. Величина Δn находится из выражения $\Delta n = \Delta / (n_k - n_n) / l$ и принимается из ряда 0,2; 0,3 об/мин и т. д. Параметры переменных режимов резания (подачи и частоты вращения шпинделя) $n_n, \Delta n, S_n, \Delta S, \Delta l$ задаются в кадре управляющей программы (УП) совместно с другой информацией либо формируются в модуле, выполняющем аппроксимацию кривых изменения частоты вращения шпинделя и подачи в функции пути. Схема алгоритма, реализующего математическую модель согласованного изменения частоты вращения шпинделя и минутной подачи, представлена на рис. 1. Здесь, кроме поясненных выше обозначений $n, \Delta n, S, \Delta S, \Delta l$, принято: $\Delta l'$ - текущее значение Δl .

Работа по алгоритму происходит следующим образом. После очередного цикла интерполяции выполняется анализ, запрограммировано ли в данном кадре УП линейное изменение частоты вращения шпинделя и подачи (содержимое ячейки $\Delta l' \neq 0$), если “да”, то содержимое ячейки $\Delta l'$ уменьшается на единицу и результат вычисления проверяется на равенство нулю. Так происходит до тех пор, пока величина $\Delta l'$ не станет равной нулю. При этом по максимальной координате отрабатывается такое количество импульсов, которое равно числу дискрет, необходимому для увеличения (или уменьшения) частоты вращения шпинделя на величину Δn , а скорости минутной подачи на величину ΔS .

Скорость резания V при заданных значениях частоты вращения шпинделя (заготовки) n и диаметра обработки D определяется по следующей формуле

$$V = \pi D n / 1000. \quad (3)$$

Заменив в (3) n значением n_k из (1), получим зависимость для определения текущего значения скорости резания при изменении частоты вращения шпинделя в функции пути.

$$V = \pi D \left(n_n \pm \frac{l}{\Delta l} \Delta n \right) / 1000. \quad (4)$$

Устройство ЧПУ по алгоритму управления реализует минутную подачу. Но процесс резания для большинства методов механической обработки характеризуется подачей на оборот S_o . Зависимость для определения текущего значения S_o при согласованном изменении частоты вращения шпинделя (заготовки) n и минутной подачи S в функции пути имеет вид

$$S_o = \frac{S_n \pm n_s \Delta S}{n_n \pm n_s \Delta n}. \quad (5)$$

Зависимость (5) получена путем подстановки в формулу $S_o = S/n$ вместо S значения S_k из (2), а вместо n значения n_k из (1) и замены отношения $l/\Delta l$ на n_s . Знак "плюс" в числителе и знаменателе равенства соответствует режиму разгона, "минус" – режиму замедления.

Для оценки производительности и динамических характеристик процесса нестационарного резания необходимо установить зависимости, описывающие изменения подачи и скорости резания в функции времени.

Время обработки участка поверхности заготовки длиной l при реализации данного алгоритма следует рассматривать, как сумму времен обработки участков длиной Δl на различной скорости подачи и может быть представлено в виде суммы t_s ряда. В случае увеличения скорости подачи (разгона) t_s равно

$$t_s = \sum_{k=1}^{n_s} \frac{\Delta l}{S_H + (k-1)\Delta S},$$

где n_s - число приращений подачи на участке длиной l ($n_s = l/\Delta l$), k - переменная.

Приняв в качестве пределов интегрирования порядковые номера 1 и n_s членов ряда, между которыми необходимо определить сумму, получим

$$t_s = \int_1^{n_s} \frac{\Delta l}{S_H + (k-1)\Delta S} dk.$$

После преобразования

$$\begin{aligned} t_s &= \frac{\Delta l}{\Delta S} \int_1^{n_s} \frac{d(S_H + k\Delta S - \Delta S)}{S_H + k\Delta S - \Delta S} = \\ &= \frac{\Delta l}{\Delta S} \ln(S_H + k\Delta S - \Delta S) \Big|_1^{n_s} = \frac{\Delta l}{\Delta S} \ln(S_H + n_s\Delta S - \Delta S) - \frac{\Delta l}{\Delta S} \ln S_H \end{aligned}$$

Откуда

$$n_s = \frac{e^{\frac{\Delta S}{\Delta l} t_s} S_H + \Delta S - S_H}{\Delta S}. \quad (6)$$

Подставив значение n_s из (6) в (5) и выполнив преобразования, получим зависимость для определения текущего значения подачи на оборот заготовки (инструмента) S_o в функции времени для режима разгона

$$S_o = \frac{\left(e^{\frac{\Delta S}{\Delta l} t_s} S_n + \Delta S \right) \Delta S}{n_n \Delta S + \left(e^{\frac{\Delta S}{\Delta l} t_s} S_n + \Delta S - S_n \right) \Delta n} \quad (7)$$

Текущее значение скорости резания v в функции времени для режима разгона при этом определяется соотношением

$$v = \frac{\pi D}{1000} \left[n_n + \left(e^{\frac{\Delta S}{\Delta l} t_s} S_n + \Delta S - S_n \right) \Delta n / \Delta S \right] \quad (8)$$

Зависимость (8) получена путем подстановки в (4) значения n_s из (6) с учетом того, что $n_s = // \Delta l$. Соотношения для определения текущих значений S_o и v в режиме замедления могут быть получены аналогично (7) и (8). Отличие состоит в том, что в формулах (4) и (5) принимается знак "минус".

По алгоритму прерывания подачи управляющее устройство периодически через определенное число импульсов n_B , поступающих на привод подач, выдает импульсы n_A , которые на привод подач не поступают (отрабатываются фиктивно)[5]. В результате, периодически, после перемещения исполнительного органа станка на расстояние длиной $L_B = n_B Z_0$, устройством ЧПУ отрабатывается фиктивное перемещение $L_A = n_A Z_0$, где Z_0 - величина перемещения исполнительного органа станка при отработке одного импульса, выдаваемого устройством ЧПУ на привод подач. Время на перемещение L_B и время на фиктивное перемещение L_A (выдержка времени) определяются скоростью минутной подачи, задаваемой в кадре УП.

Работа по алгоритму происходит следующим образом. При поступлении заявки на интерполяцию происходит анализ, запрограммировано ли в кадре УП прерывание подачи (содержимое ячейки $L'_B \neq 0$), если "да", то содержимое ячейки L'_B уменьшается на единицу. Так происходит до тех пор, пока величина L'_B не станет равной нулю. Это говорит о том, что происходит прекращение подачи и управляющее устройство начинает отработку фиктивного перемещения L'_A с заданной в УП скоростью. Операции с величиной L'_A аналогичны описанным выше операциям с величиной L'_B . При достижении величиной L'_A значения равного нулю происходит формирование величин L_B и L_A для следующего включения подачи. Здесь L'_A и L'_B текущие значения L_A и L_B соответственно.

Время t_n на перемещение участка траектории длиной l с прерыванием подачи определяется по следующей зависимости: $t_n = l(L_A + L_B) / L_B S$, где S - минутная подача.

Технологические циклы обработки отверстий с введением в процесс резания кинематической неустойчивости в соответствии с представленными математическими моделями и алгоритмами управления представлены на рис. 1 – 4.

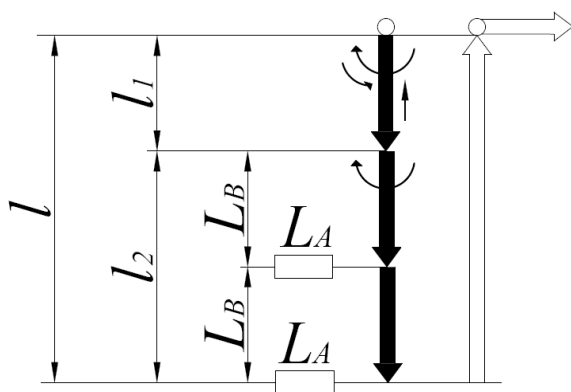


Рис. 1 – Схема цикла глубокого сверления

Параметры цикла:
 $l, l_1, n_1, S_1, \Delta l_1, \Delta n, \Delta S, l_2, n_2, S_2, L_A, L_B$.

На первом этапе цикла осуществляется плавное уменьшение частоты вращения шпинделя от n_1 до n_2 приращениями Δn и минутной подачи от S_1 до S_2 приращениями ΔS . В конце второго этапа цикла и каждого последующего осуществляется прерывание подачи на время, определяемое величиной параметра L_A .

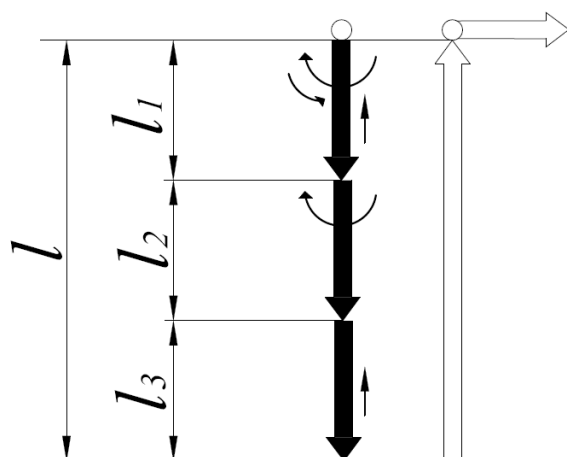


Рис. 2 – Схема цикла сверления хрупких материалов

Параметры цикла:

$l, l_1, n_1, S_1, \Delta l_1, \Delta n, \Delta S, l_2, n_2, S_2, l_3, \Delta l_3, \Delta S_3$

На первом этапе цикла осуществляется плавное уменьшение частоты вращения шпинделя от n_1 до n_2 приращениями Δn и минутной подачи от S_1 до S_2 приращениями ΔS . В начале последнего этапа цикла осуществляется уменьшение минутной подачи S_2 приращениями величиной ΔS_3 по мере отработки перемещений длиной Δl_3 .

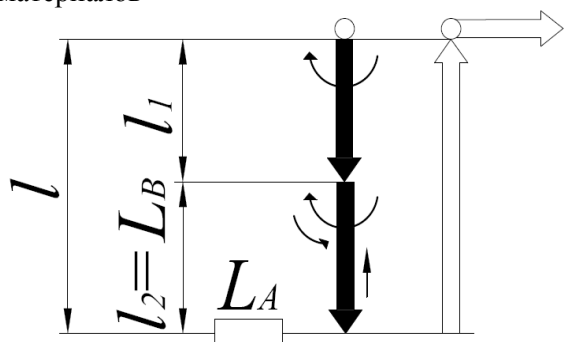


Рис. 3 – Схема цикла центрования

Параметры цикла:

$l, l_1, n, S, l_2, \Delta l, \Delta n, \Delta S, L_A, L_B$.

На первом этапе цикла осуществляется обработка с постоянными частотой вращения шпинделя n и подачей S . Второй этап цикла начинается с уменьшения частоты вращения шпинделя n приращениями Δn и подачи S приращениями ΔS , заканчивается выдержкой времени, определяемой величиной параметра L_A .

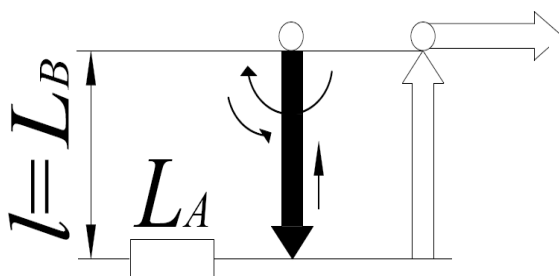


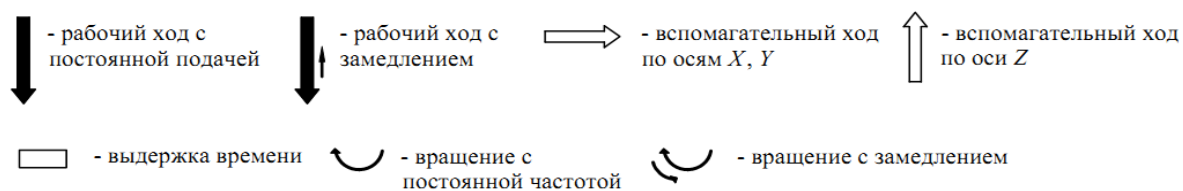
Рис. 4 – Схема цикла зенкования

Параметры цикла:

$l, n, S, \Delta l, \Delta n, \Delta S, L_A, L_B$

Цикл начинается с уменьшения частоты вращения шпинделя приращениями Δn и подачи ΔS и заканчивается выдержкой времени, определяемой величиной параметра L_A .

Условные обозначения



Формирование структуры каждого из циклов осуществляется на этапе разработки подпрограммы с использованием формальных параметров под адресом \bar{K} [2]. Обращение к подпрограмме, число ее повторов и значения формальных параметров записываются в кадре основной УП. Причем под адресом \bar{K} задаются как геометрические параметры цикла, так и параметры, определяющие режим нестационарного резания.

Экспериментальная проверка циклов обработки отверстий с включением в процесс резания кинематической неустойчивости проводилась с использованием многооперационного вертикального сверлильно-фрезерно-расточного станка мод. 21104П7Ф4. Обрабатывались отверстия диаметром 20 мм в заготовке из стали 45. Обработка велась сверлом из инструментальной стали Р6М5. Геометрические параметры режущей части: $\alpha = 11^\circ$; $2\varphi = 120^\circ$; $\omega = 30^\circ$. В качестве смазочно-охлаждающей жидкости применялась эмульсия. Был реализован цикл глубокого сверления. По этому циклу врезание осуществлялось с плавным уменьшением частоты вращения сверла от 700 до 300 об/мин, а подачи от 160 до 60 мм/мин. Параметры нестационарного резания при этом были приняты следующими: $l_1 = 6$ мм; $n_1 = 700$ об/мин; $S_1 = 160$ мм/мин; $\Delta l = 0,006$ мм; $\Delta n = 0,4$ об/мин; $\Delta S = 0,1$ мм/мин. Зависимости частоты вращения сверла n и осевой подачи S от пути врезания представлены на рис. 5.

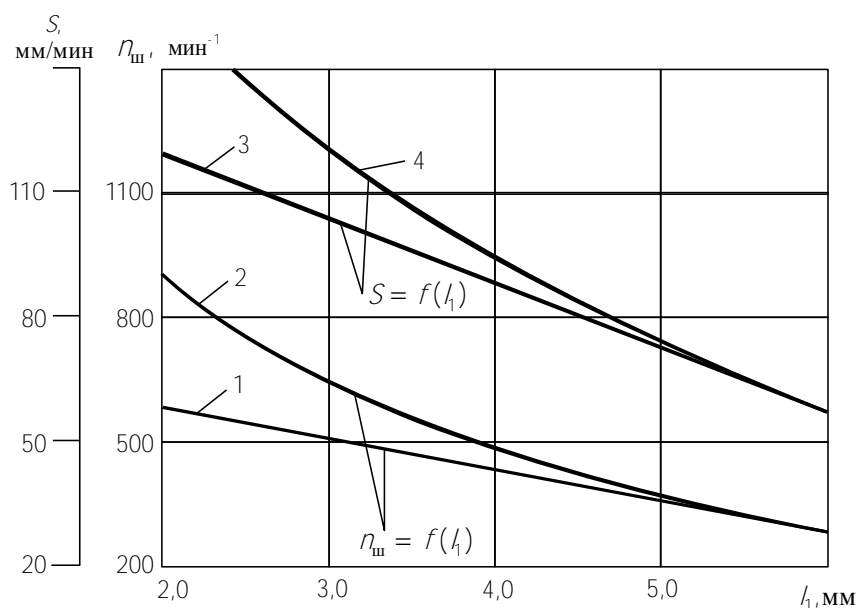


Рис. 5 – Зависимости частоты вращения шпинделя (сверла) $n_{ш}$ и осевой подачи S от длины перемещения l_1 в режиме замедления: 1,3 – при изменении $n_{ш}$ и S по алгоритму управления; 2,4 – расчетные

Расчетные зависимости получены из условия, что значения скорости резания и подачи на оборот на всем пути врезания сверла в заготовку остаются постоянными и равными соответственно 20 м/мин и 0,2 мм/об. При выполнении расчетов учитывалось, что радиус цилиндра ρ , на котором расположена точка главного лезвия сверла, вступающая в процесс резания, связана с текущим значением глубины врезания l'_1 зависимостью $\rho = l'_1 \tan \varphi$, где φ – угол в плане. Дальнейшая обработка отверстия велась в режиме прерывания подачи с последующей выдержкой времени. На

этом этапе обработки параметры нестационарного резания были приняты следующими: $l_2 = 140$ мм; $n_2 = 300$ об/мин; $S_2 = 60$ мм/мин; $L_A = 0,2$ мм; $L_B = 10$ мм. Эти значения параметров обеспечивают периодическое прерывание подачи на время одного оборота сверла через каждые 10 мм на всем пути перемещения длиной 140 мм. В результате установлено, что за счет управления подачей и частотой вращения шпинделя на этапе врезания сверла в заготовку компенсируются потери времени на втором этапе цикла, обусловленные периодическим прерыванием подачи. Кроме того, в процессе сверления обеспечивалось надежное дробление стружки и свободный доступ охлаждающей жидкости в зону резания.

Выводы. Включение в состав технологического программного обеспечения микропроцессорного устройства ЧПУ программных модулей, реализующих алгоритмы управления подачей и частотой вращения шпинделя в функции пути, расширяет функциональные возможности станка (практически любого типа). Для многооперационных станков это выражается в возможности создания постоянных циклов с новой структурой, используемых для совершенствования процесса обработки отверстий, а также в уменьшении затрат на разработку и отладку УП. При обработке глубоких отверстий прерывание подачи с последующей выдержкой времени может быть использовано также с целью кинематического дробления стружки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гжиров Р. И., Серебrenицкий П. П. Программирование обработки на станках с ЧПУ: Справочник. – Л.: Машиностроение, 1990. – 588 с.
2. Каштальян И. А., Клевзович В. И. Обработка на станках с числовым программным управлением: - Мн.: Выш. шк., 1989. – 271 с.
3. Невельсон М. С. Автоматическое управление точностью обработки на металлорежущих станках. Л.: Машиностроение, 1982. – 184 с.
4. Подураев В. Н. Автоматически регулируемые и комбинированные процессы резания. М.: Машиностроение, 1977. – 304 с.
5. Каштальян И. А. Эффективные кинематически нестабильные процессы формообразования на станках с ЧПУ // Машиностроение. – Мн., 2002. – Вып 18. С. 310 – 318.
6. Патент BY 5128 C1 МПК G05B 19/18, 19/416. Устройство числового программного управления / Каштальян И. А., Резниченко В. И., Пархутик А. П. , заявл. 26.11.1998; опубл. 30.06.2003. Бюл. №2. // Открытия и изобретения. – 2003. -№2. – С. 34.

УДК 621.777.42

Мрочек Ж.А., Иващенко С.А., Фролов И.С.

ОСНОВНЫЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПЛАЗМЕННО-ВАКУУМНЫХ ПОКРЫТИЙ

**Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь**

Известно более 20 способов формирования физико-механических свойств поверхностей изделий. Плазменно-вакуумный способ позволяет получать покрытия из тугоплавких материалов, карбидов, силицидов, нитридов, а также многослойные покрытия. В статье представлены результаты исследований физико-механических свойств плазменно-вакуумных титановых и нитридтитановых покрытий.

Известно, что важнейшими свойствами плазменно-вакуумных покрытий являются адгезионная прочность, плотность и пластичность.

Основное требование, предъявляемое к любому защитному покрытию, - его высокая адгезионная прочность, так как в случае низкой адгезионной прочности оно не может выполнять свое функциональное назначение. Для эффективной защиты изделия от коррозии необходимы высокая